



Programa de Pós-Graduação em Produção Vegetal no Semiárido

**CARACTERIZAÇÃO FÍSICO-HÍDRICA DO SOLO
APÓS CULTIVOS FERTIRRIGADOS COM ÁGUA
RESIDUÁRIA SANITÁRIA TRATADA**

Fernando Lopes Godinho

2019

FERNANDO LOPES GODINHO

**CARACTERIZAÇÃO FÍSICO-HÍDRICA DO SOLO APÓS CULTIVOS
FERTIRRIGADOS COM ÁGUA RESIDUÁRIA SANITÁRIA TRATADA**

Dissertação apresentada à Universidade Estadual de Montes Claros, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Produção Vegetal no Semiárido, área de concentração em Produção Vegetal, para obtenção do título de Mestre.

Orientador
Prof. Dr. Silvânio Rodrigues dos Santos

Janaúba
2019

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001

Ficha catalográfica

G585c Godinho, Fernando Lopes
Caracterização físico-hídrica do solo após cultivos fertirrigados com água residuária sanitária tratada. [manuscrito] / Fernando Lopes Godinho. – 2019. 50 p.

Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Produção Vegetal no Semiárido, Universidade Estadual de Montes Claros – Janaúba, 2019.

Orientador: Prof. D. Sc. Silvânio Rodrigues dos Santos

1. Infiltração 2. Retenção de água 3. Esgoto sanitário I. Santos, Silvânio Rodrigues dos. II. Universidade Estadual de Montes Claros. III. Título.

CDD. 628.3623

Catálogo: Joyce Aparecida Rodrigues de Castro Bibliotecária CRB6/2445

FERNANDO LOPES GODINHO

**CARACTERIZAÇÃO FÍSICO-HÍDRICA DO SOLO APÓS CULTIVOS
FERTIRRIGADOS COM ÁGUA RESIDUÁRIA SANITÁRIA TRATADA**

Dissertação apresentada à Universidade Estadual de Montes Claros, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Produção Vegetal no Semiárido, área de concentração em Produção Vegetal, para obtenção do título de Mestre.

APROVADA em 25 de fevereiro de 2019.

Prof. Dr. Silvânio Rodrigues dos Santos
UNIMONTES (Orientador)

Prof. Dr. Marcos Koiti Kondo
UNIMONTES (Coorientador)

Dra. Polyanna Mara de Oliveira
EPAMIG (Conselheira)

Dr. João Batista Ribeiro da Silva Reis
EPAMIG (Conselheiro)

Janaúba
2019

Aos pais que abdicaram de muito para me possibilitar tudo, é deles essa vitória...

Dedico...

AGRADECIMENTOS

A Deus, por me iluminar e me manter firme perante as dificuldades da vida;

À Universidade Estadual de Montes Claros – UNIMONTES, pela acolhida durante o mestrado;

Ao Programa de Pós-Graduação em Produção Vegetal no Semiárido – PPGPVS, pela oportunidade;

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – CAPES, ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico - CNPq e à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais – FAPEMIG, pela concessão de bolsa de estudos e apoio financeiro;

Aos professores da pós-graduação, pelos ensinamentos e conhecimentos transmitidos;

Ao meu orientador, Professor Silvânio Rodrigues dos Santos, por toda a carga de conhecimento disponibilizada durante os últimos dois anos, pelas aulas de paciência, disponibilidade e cordialidade proporcionadas;

Ao meu coorientador, professor Marcos Koiti Kondo pelas relevantes contribuições e ensinamentos;

Aos demais membros, pesquisadora da EPAMIG, Dra. Polyanna Mara de Oliveira e Dr. João Batista, por aceitarem participar da minha banca de defesa e pelas sugestões dadas;

Aos meus pais, por todo o esforço e dedicação para me proporcionar possibilidades de evoluir enquanto pessoa e profissional, por me ensinarem a ir em busca dos meus sonhos sem atrapalhar os sonhos de ninguém;

Ao Grupo de Irrigação: Edson, Guilherme, Jaciara, Igor, Sara, Marffizia e Amanda, pelo auxílio durante a condução do experimento;

Aos amigos de república, João Victor e Hugo, por aguentarem firmes todos os momentos de estresse e sobrecarga;

À professora Camila pela disponibilidade para ajudar nas dúvidas sobre as análises estatísticas;

Aos funcionários da UNIMONTES, por manterem o ambiente propício aos estudos e propiciarem transporte;

A todos que de alguma forma estiveram comigo e ajudaram nesta grande conquista.

Muito obrigado!

SUMÁRIO

RESUMO GERAL	1
GENERAL ABSTRACT.....	3
1. INTRODUÇÃO GERAL	5
2. ARTIGO 1.....	8
Modelos de velocidade de infiltração de água em solo submetido à fertirrigação com água residuária sanitária tratada.....	9
Resumo	9
Abstract	10
2.1. INTRODUÇÃO	11
2.2. MATERIAL E MÉTODOS	12
2.3. RESULTADOS E DISCUSSÃO	17
2.4. CONCLUSÕES.....	23
LITERATURA CITADA.....	26
3. ARTIGO 2.....	30
Caracterização físico-hídrica do solo após cultivos fertirrigados com água residuária sanitária tratada	31
Resumo	31
Abstract	32
3.1. INTRODUÇÃO	33
3.2. MATERIAL E MÉTODOS	34
3.3. RESULTADOS E DISCUSSÃO	37
3.4. CONCLUSÕES.....	45
LITERATURA CITADA.....	47

RESUMO GERAL

O crescimento urbano e industrial intensificou a produção de resíduos nos últimos anos que, em grande parte do país, tem como destino direto os corpos hídricos causando desequilíbrio ambiental e diminuição da qualidade da água. Mesmo após serem submetidos a tratamento e seguindo a legislação vigente o esgoto tratado também pode ser capaz de eutrofizar a água do corpo receptor. Fazem-se necessários estudos que busquem alternativas de reúso dos produtos do tratamento do esgoto a fim de destiná-lo de forma sustentável e segura ao meio ambiente. A agricultura tem se mostrado um destino viável e diversos estudos são publicados no mundo com esse enfoque. Dessa forma, objetivou-se avaliar possíveis alterações no movimento e retenção de água em Latossolo Vermelho eutrófico, ao final de aplicações sucessivas de água residuária sanitária de tratamento terciário (ART) em milho (nov/2012 a fev/13), algodoeiro (jun a nov/13), feijoeiro comum (abr a jun/14) e abacaxizeiro (jul/15 a mar/17) visando o fornecimento parcial de nutrientes às plantas. Todos os cultivos foram conduzidos em campo na mesma área e nas mesmas parcelas experimentais envolvendo 5 tratamentos de ART (0: água limpa e adubação mineral; 1: 50; 2: 100; 3: 150 e 4: 200% da dose de ART limitada pelo elemento referência K^+ nos 3 primeiros cultivos e 0: água limpa e adubação mineral; 1: 100; 2: 200; 3: 300 e 4: 400% da dose de ART limitada pelo elemento referência Na^+ no abacaxizeiro) dispostos no delineamento em blocos completos casualizados, com 4 repetições. Avaliou-se a condutividade elétrica do extrato saturado (CEes), porcentagem de sódio trocável (PST), argila dispersa em água (ADA), disponibilidade total de armazenamento de água (DTA) estratificadas em

camadas de 0,2 m até 0,8 m de profundidade e velocidade de infiltração básica de água no solo (VIB), velocidade de infiltração ao tempo de 1,5 h (VI_{1,5}) e condutividade hidráulica (K₀) medidas na superfície do solo em campo. Além disso, determinou-se qual modelo empírico melhor se ajustou aos dados de velocidade de infiltração determinados em campo. Verificou-se uma diminuição linear de 0,0972 mm h⁻¹, 0,0997 mm h⁻¹ e 0,0073 cm h⁻¹, respectivamente, na velocidade de infiltração básica, velocidade de infiltração no tempo de 1,5 h e condutividade hidráulica saturada, para cada mm de água residuária incrementada no solo, além de aumento da porcentagem de sódio trocável até 0,6m de profundidade. Determinou-se que para as condições estudadas o modelo empírico de Kostiakov mostrou-se o mais eficiente para ajustar os dados coletados em campo e estimar as velocidades de infiltração. Ainda com as alterações observadas, constatou-se que não houve comprometimento do movimento e retenção de água do solo, já que as respostas da análise dos dados determinados não ultrapassam limites tidos como seguros em literatura. Portanto, recomenda-se o uso de ART na fertirrigação pautada em elemento referência sem riscos ao movimento e retenção de água no solo.

Palavras-chave: Infiltração; retenção de água; fertirrigação; esgoto sanitário; reúso de água.

GENERAL ABSTRACT

The urban and industrial growth has intensified the production of waste in recent years, which in large part of the country has a direct destination to the water bodies causing environmental imbalance and a decrease in water quality. Even after being treated and following the current legislation the treated sewage may also be able to eutrophize the water of the receiving body. Studies are needed that look for alternatives of reuse of the products of the treatment of the sewage in order to destine it in a sustainable and safe way to the environment. The agriculture has proved to be a viable destination and a number of studies are published worldwide with this approach. The objective of this study was to evaluate possible changes in water movement and retention in eutrophic Red Latosol at the end of successive applications of tertiary sanitary wastewater (ART) in maize (Nov/2012 to Feb/13), cotton to nov/13), common bean (Apr to jun/14) and pineapple (Jul/15 to March/17) aiming at the partial supply of nutrients to the plants. All cultivations were conducted in the same area and in the same experimental plots involving 5 treatments of ART (0: clean water and mineral fertilization, 1: 50, 2: 100, 3: 150 and 4: 200% (Table 1), and in the first 3 crops and 0: clean water and mineral fertilization, 1: 100, 2: 200, 3: 300 and 4: 400% of the ART dose limited by the reference Na + element in the pineapple) , with 4 replicates. The field experiment was carried out in Janaúba - MG at the end of the four cycles. It was evaluated the electrical conductivity of the saturated extract (ECes), exchangeable sodium percentage (PST), water dispersed clay (ADA), total water storage availability (DTA) stratified in layers of 0.2 m to 0.8 m depth and basic infiltration velocity (VIB), infiltration velocity at 1.5 h (VII.5) and hydraulic conductivity (K0) measured at the field surface. In addition, which empirical model was best fitted to the infiltration velocity data collected in the field was

determined. A linear decrease of 0.0972 mm h^{-1} , 0.0997 mm h^{-1} and 0.0073 cm h^{-1} , respectively, was observed in the basic infiltration rate, time infiltration rate of 1.5 and conductivity for each mm of waste water increased in the soil, in addition to increasing the percentage of exchangeable sodium up to 0.6m deep. It was determined that for the studied conditions the empirical model of Kostiakov was the most efficient to adjust the data collected in the field and to estimate infiltration velocities. Still with the changes observed, it was verified that there was no impairment of movement and retention of soil water, since the answers of the analysis of the data collected do not exceed limits considered as safe in the literature. Therefore, it is recommended the use of ART in fertigation guided in reference element without risks to the movement and retention of water in the soil.

Keywords: Infiltration; water retention; fertigation; sanitary sewage; water reuse.

1. INTRODUÇÃO GERAL

O lançamento de forma direta de esgoto em corpos receptores ainda é situação comum em muitas cidades do país. Segundo o levantamento do Atlas Esgotos mais recente, em Minas Gerais, 86% dos 853 municípios possuem coleta de esgoto, dos quais apenas 44% passam por processo de tratamento, tendo como destino o corpo hídrico (ANA, 2017). Mesmo seguindo a legislação vigente (BRASIL, 2005; MINAS GERAIS, 2008) os efluentes dos sistemas de tratamento ainda possuem elementos capazes de eutrofizar os corpos hídricos.

Um dos destinos possíveis para a água residuária sanitária tratada (ART) é a agricultura, uma vez que, dos componentes danosos ao corpo receptor presentes nela, a maioria é aproveitável pelas plantas como nutrientes (CARR, POTTER E NORTCLIFF, 2011; QUEIROZ, 2015; SILVA, 2018). Tal possibilidade evita o descarte direto no meio ambiente, minimizando impactos, além de conservar a água de boa qualidade disponível e promover uma reciclagem natural de nutrientes.

A irrigação é o principal consumidor da água de boa qualidade no Brasil (ANA, 2018). Contudo, em um país referência em produção agrícola o uso de tal tecnologia é primordial, principalmente em regiões onde as chuvas são irregulares e as secas prolongadas. Dessa forma, associando à necessidade por irrigação e a possibilidade do uso da ART como fonte de nutrientes, cria-se uma alternativa para a diminuição dos impactos causados com o descarte dos efluentes nos corpos de água.

No entanto, a fertirrigação com ART deve ser acompanhada e bem dimensionada, já que aplicações sucessivas e em dosagens elevadas podem comprometer a qualidade do solo, aumentando a quantidade de sódio trocável, interferindo na disponibilidade de cálcio, magnésio e potássio para as plantas, além da possibilidade de promover alterações na infiltração e movimentação de água no solo. A

composição química da ART contém sódio em altos teores, este pode concentrar no solo aumentando a condutividade elétrica, reduzindo a absorção de água e nutrientes pela planta. Além disso, a desordem na proporção do íon Na^+ pode causar alterações na estrutura do solo, como dispersão de argilas, conseqüentemente, redução do número de macroporos e alteração no fluxo da água no solo.

Em estudos controlando a dosagem de ART em função da proporção de um elemento referência, na mesma área avaliada neste estudo, os resultados mostraram ser possível aproveitar a ART na agricultura de forma segura e eficiente (ALVES *et al.*, 2018; OLIVEIRA, 2018; SANTOS *et al.*, 2017).

Dessa forma, para o uso consciente e seguro da ART um manejo do solo e água a fim de proporcionar a menor alteração possível no solo e no seu armazenamento e movimento de água, faz-se necessário conhecer suas características físico-hídricas.

Diante do exposto e visto a relevância do tema abordado, objetivou-se avaliar possíveis alterações no movimento e retenção de água em Latossolo Vermelho Eutrófico, depois do cultivo sequencial com a aplicação de água residuária sanitária tratada.

REFERÊNCIAS

ALVES, P. F. S.; SANTOS, S. R. DOS; KONDO, M. K.; ARAÚJO, E. D.; OLIVEIRA, P. M. DE. Fertirrigação do milho com água residuária sanitária tratada: crescimento e produção. **Engenharia Sanitaria e Ambiental**, 2018.

ANA. **Agência Nacional de Águas (ANA) - Atlas Esgotos - Depoluição de bacias hidrográficas**. BRASÍLIA-DF: 2017.

ANA. **Conjuntura dos recursos hídricos no Brasil: informe anual/Agência Nacional de Águas**. BRASÍLIA-DF: 2018.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. Resolução CONAMA 357, de 18 de março de 2005. Dispõe sobre a classificação dos corpos de água e diretrizes ambientais para o seu enquadramento, bem como estabelece as condições e padrões de lançamento de efluentes, e dá outras providências. **Diário Oficial da União**. Brasília, DF, 18/03/2005, n. 053, p. 58-63. Disponível em: <<http://www.mma.gov.br/port/conama/res/res05/res35705.pdf>>. Acesso em: 25 nov. 2018.

CARR, G.; POTTER, R. B.; NORTCLIFF, S. Water reuse for irrigation in Jordan: Perceptions of water quality among farmers. **Agricultural Water Management**, v. 98, n. 5, p. 847–854, 2011.

MINAS GERAIS. Conselho Estadual de Política Ambiental. Conselho Estadual de Recursos Hídricos do Estado de Minas Gerais – COPAM/CERH-MG. Deliberação Normativa Conjunta COPAN/CERH n001, de 05 de maio de 2008. Dispõe sobre a classificação dos corpos de água e diretrizes ambientais para o seu enquadramento, bem como estabelece as condições e padrões de lançamento de efluentes, e dá outras providências. **Diário do Executivo “Minas Gerais”**. Belo Horizonte, MG, 20/05/2008. Disponível em: <<http://www.siam.mg.gov.br/sla/>>. Acesso em: 25 nov. 2018.

OLIVEIRA, F. S. **Fertirrigação do abacaxizeiro com água residuária sanitária tratada**. [s.l.] Universidade Estadual de Montes Claros, 2018.

QUEIROZ, A. A. DE. Reúso de efluentes domésticos na irrigação por gotejamento do tomateiro. p. 36–42, 2015.

SANTOS, S. R.; RIBEIRO, D. P.; MATOS, A. T.; KONDO, M. K.; ARAÚJO, E. D. Changes in soil chemical properties promoted by fertigation with treated sanitary wastewater. **Engenharia Agricola**, v. 37, n. 2, 2017.

SILVA, T. L. DA. Qualidade da água residuária para reuso na agricultura irrigada. **Irriga Botucatu**, v. 1, n. 1, p. 101–111, 2018.

2. ARTIGO 1

Modelos de infiltração de água no solo submetido à fertirrigação com água residuária sanitária tratada

Resumo: O uso de água residuária sanitária tratada na fertirrigação é um mecanismo promissor, seus efeitos no fluxo da água no solo são estudados por diversos pesquisadores inclusive com enfoque na velocidade de infiltração da água, que, devido à variabilidade em campo, necessita de modelos de ajustena estruturação dos dados coletados. Dessa forma, propôs-se determinar o melhor modelo empírico, dentre os mais utilizados, no ajuste dos dados de velocidade de infiltração adquiridos em teste de anéis concêntricos em Latossolo Vermelho eutrófico, pós-cultivos sucessivos com uso de água residuária sanitária tratada como fonte parcial de nutrientes. O experimento de campo foi realizado em Janaúba - MG. Todos os cultivos foram conduzidos mantendo as mesmas parcelas experimentais em uma mesma área que foi submetida a cinco tratamentos (0: água limpa e adubação mineral; 1: 50; 2: 100; 3: 150 e 4: 200% da dose de água residuária limitada pelo elemento referência K^+ nos três primeiros cultivos e 0: água limpa e adubação mineral; 1: 100; 2: 200; 3: 300 e 4: 400% da dose limitada pelo elemento referência Na^+ no abacaxizeiro) em delineamento em blocos casualizados e quatro repetições. Avaliaram-se três modelos empíricos utilizados no ajuste da curva de velocidade de infiltração, Kostiakov, Kostiakov Lewis e Horton utilizando a Raiz do erro quadrático médio, coeficiente de correlação de Pearson, índice de concordância de Willmott e coeficiente de confiança. O modelo de Kostiakov possibilitou o melhor ajuste e foi considerado, portanto, o melhor a ser utilizado nas condições avaliadas neste estudo.

Palavras-chave: Infiltração; retenção de água; fertirrigação; esgoto sanitário; reúso de água.

Testing of adjustment models in infiltration speed of soil subjected to fertirrigation with treated wastewater

Abstract: The use of treated wastewater in fertirrigation is a promising mechanism, its effects on the flow of water in the soil are studied by several researchers including focusing on water infiltration velocity, which, due to the variability in the field, needs adjustment models in the soil structuring of the data collected. Thus, it was proposed to determine the best empirical model, among the most used, in the adjustment of infiltration velocity data acquired in the test of concentric rings in eutrophic Red Latosol, after successive crops using treated wastewater as partial source of nutrients. The field experiment was carried out in Janaúba - MG. All cultivations were conducted keeping the same experimental plots in the same area that was submitted to 5 treatments (0: clean water and mineral fertilization, 1: 50, 2: 100, 3: 150 and 4: 200% of the wastewater dose (Table 1), which was limited by the reference element K + in the first 3 crops and 0: clean water and mineral fertilization; 1: 100; 2: 200; 3: 300 and 4: 400% of the dose limited by the reference Na + element in the pineapple) in a randomized complete block design with 4 repetitions. Three empirical models were used to adjust the infiltration velocity curve, Kostiakov, Kostiakov and Lewis and Horton using the root mean square error, Pearson's correlation coefficient, Willmott's concordance index and confidence coefficient. The Kostiakov model allowed the best adjustment and was therefore considered the best to be used in the conditions evaluated in this study.

Keywords: Infiltration; water retention; fertigation; sanitary sewage; water reuse.

2.1. INTRODUÇÃO

A demanda hídrica brasileira aumentou e, em contramão a isso, houve uma redução no regime pluviométrico e diminuição da qualidade e disponibilidade de água (ANA, 2018), qualidade muitas vezes comprometida pelas elevadas cargas de esgoto, tratado ou não, que os corpos hídricos recebem devido ao crescimento urbano e industrial do país.

O tratamento do esgoto gera produtos que mesmo dentro das normas vigentes ainda são capazes de diminuir a qualidade da água do corpo receptor. Dessa forma, diversos estudos nos últimos anos têm possibilitado à destinação final dos produtos do tratamento de esgoto para o uso agrícola, com enormes potencialidades (ALVES *et al.*, 2018; BISONE *et al.*, 2017; IRANDOUST e TABRIZ, 2017; MHASKE e NIKAM, 2017; SANTOS *et al.*, 2017).

No entanto, os seus efeitos no solo a longo prazo ainda merecem atenção, sobretudo quanto à entrada e movimentação da água no solo (ALMEIDA *et al.*, 2018; OLIVEIRA *et al.*, 2016; PAULA e BERTOSSI, 2013). Uma das formas de avaliar a entrada da água no solo é a estimativa da velocidade de infiltração (VI) realizada em campo (BERNARDO *et al.*, 2006).

Nos métodos mais utilizados para estimar a VI ocorrem variações durante o processo de coleta de dados em campo, necessitando de modelos de ajuste para obter maior precisão e facilitar a interpretação dos dados. Porém, existem muitos modelos com resultados que variam de acordo com suas metodologias e, daí a importância de saber qual o modelo que melhor ajusta aos dados de campo (BRANDÃO *et al.*, 2006).

Portanto, para melhor interpretação da velocidade de infiltração da água no solo, objetivou-se definir o modelo que melhor se ajusta aos dados coletados em solo, ao final de 4 cultivos sequenciais fertirrigados com água residuária sanitária tratada.

2.2. MATERIAL E MÉTODOS

O experimento foi conduzido de janeiro a março de 2018 em uma área experimental advinda de parceria entre a Copasa e Unimontes, localizada ao lado da Estação de Tratamento de Esgoto (ETE) de Janaúba - MG, cujas coordenadas geográficas correspondem a latitude 15° 46' 14,5" S e longitude 43° 19' 14,31" W, com altitude de 534 m. O clima é classificado como Aw, tropical com estação seca, de acordo com a classificação de Köppen. O solo do local é classificado como Latossolo Vermelho Eutrófico (EMBRAPA, 2018).

Entre os anos de 2012 e 2017 a área avaliada foi cultivada com quatro culturas distintas e em todas foi utilizada a fertirrigação com água residuária sanitária tratada (ART) como fonte parcial de nutrientes, sendo elas o milho (novembro de 2012 a fevereiro de 2013) (ALVES *et al.*, 2018), algodão (junho a novembro de 2013) (Alves, 2014), feijão comum (abril a junho de 2014) (SANTOS *et al.*, 2017) e abacaxi (julho de 2015 a março de 2017) (OLIVEIRA, 2018).

Nos três cultivos iniciais os cinco tratamentos de ART foram de 0: água limpa e adubação mineral; 1: 50; 2: 100; 3: 150 e 4: 200% da dose de ART limitada pelo elemento referência K⁺, enquanto no 4º e último cultivo os tratamentos foram de 0: água limpa e adubação mineral; 1: 100; 2: 200; 3: 300 e 4: 400% da dose de ART limitada pelo elemento referência Na⁺, sendo os referidos tratamentos dispostos no delineamento em blocos completos casualizados, com quatro repetições.

Em todos os cultivos foram mantidas as mesmas parcelas experimentais, ou seja, a unidade experimental que recebeu a menor dose de ART continuou recebendo a menor dose no ciclo seguinte. Isso para que fosse possível quantificar as doses de ART totais aplicadas em cada uma das parcelas experimentais (1: 327,8 mm; 2: 647,8 mm; 3: 972,6 mm; 4: 1292,5 mm; 5: 0 mm;).

A irrigação foi manejada em todos os ciclos que antecederam as avaliações, a fim de manter a umidade próxima à capacidade de campo em todas as parcelas até os 0,4m de profundidade. Partiu-se do fato que a exigência em água é superior à de nutrientes presentes na ART. Dessa forma, fez-se a complementação com água de boa qualidade em todos os cultivos e tratamentos. Os emissores do sistema de gotejamento utilizados foram espaçados de 0,4 m entre si e 0,9 m entre linhas laterais e a vazão média foi de 5,81 L h⁻¹.

Em fevereiro de 2018, no intuito de estimar a velocidade de infiltração (VI) após uma limpeza da superfície, procedeu-se o método de infiltrômetro de anéis concêntricos para cada unidade experimental (TEIXEIRA *et al.*, 2017). Os anéis foram cravados no solo até 0,15 m de profundidade, com água adicionada no anel externo no intuito de minimizar o movimento horizontal da água a ser adicionada no anel interno.

Com o auxílio de um papel filme para o início do teste, foi adicionada água no anel interno e a altura acompanhada com o auxílio de uma régua milimetrada até a estabilização, notada quando a variação média das velocidades dos últimos valores medidos estivesse dentro $\pm 10\%$ no intervalo de 60 minutos (BERNARDO *et al.*, 2006).

Para cada unidade experimental obteve-se uma série de dados brutos que deles, geraram-se gráficos referentes às velocidades em que a água infiltrou com o passar do tempo até a estabilização (Figura 1).

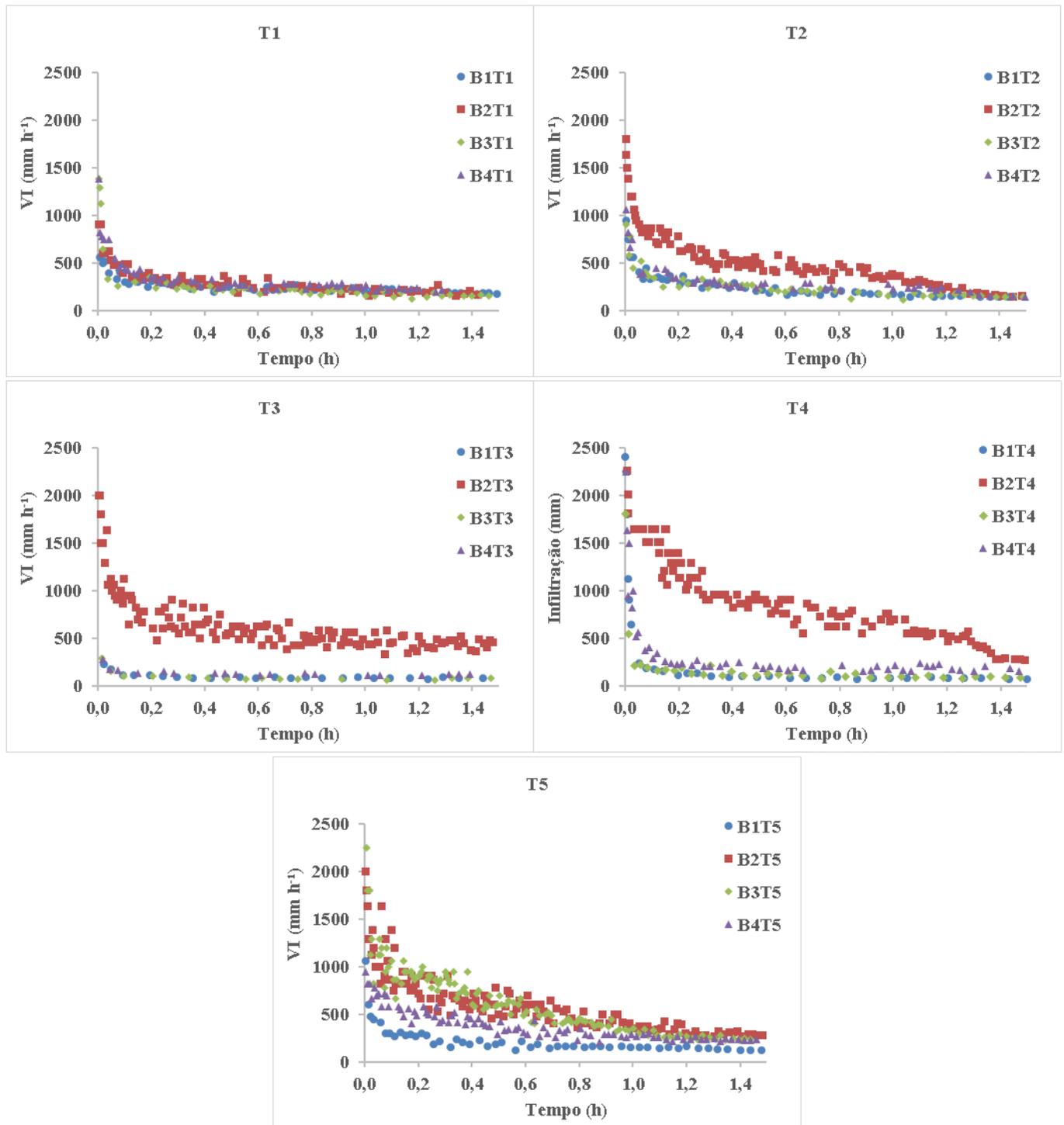


Figura1: Dados brutos coletados nos testes de velocidade de infiltração realizados em cada unidade experimental envolvendo doses de água residuária sanitária tratada (T1: 327,8 mm; T2: 647,8 mm; T3: 972,6 mm; T4: 1292,5 mm; T5: 0 mm).

Devido à variabilidade dos dados coletados, utilizaram-se os modelos empíricos Kostiakov, Kostiakov-Lewis e Horton (BRANDÃO *et al.*, 2006) (Eq. 1, Eq. 2 e Eq. 3), no intuito de ajustar os dados e possibilitar uma interpretação fidedigna da velocidade de infiltração de água no solo.

$$V_i = k \cdot n \cdot t^{n-1} \quad \text{Eq. 1}$$

Em que:

V_i - Velocidade de infiltração (mmh^{-1});

k - Parâmetro dependente da umidade inicial do solo;

n - Constante dependente do solo, varia entre 0 e 1;

t - Tempo (h)

$$V_i = k \cdot t^n + V_{ib} \cdot t \quad \text{Eq. 2}$$

Em que:

V_{ib} - Velocidade de infiltração básica (mmh^{-1}).

$$V_i = V_f + (V_0 - V_f) \cdot e^{-Kt} \quad \text{Eq. 3}$$

Em que:

V_f - Velocidade de infiltração no final do processo (mmh^{-1});

V_0 - Velocidade de infiltração no início do processo (mmh^{-1});

K - Parâmetro obtido pela ferramenta solver do *programa* Excel®.

Com os modelos descritos por Brandão *et al.* (2006) foram geradas 60 curvas, sendo necessário definir qual deles melhor se ajustaria aos dados observados. Para tanto, efetuou-se uma série de testes estatísticos, mediante o pareamento dos dados

observados com os preditos por cada modelo, sendo eles: Raiz do erro quadrático médio (Willmott e Matsuura, 2005), Coeficiente de correlação de Pearson (Wilks, 2006), Índice de concordância de Willmott (WILLMOTT, 1981) e Coeficiente de confiança (CAMARGO e SENTELHAS, 1997).

Para escolher o modelo observou-se o predomínio de menor raiz do erro quadrático médio, maiores coeficientes de correlação, índice de concordância e coeficiente de confiança. Sendo o coeficiente de confiança (c), já bastante difundido no meio acadêmico como um bom parâmetro estatístico de avaliação de ajuste (PRIMO *et al*, 2019; RUELAS, 2018; SANTANA *et al*, 2018), o principal responsável pela escolha do modelo para gerar os dados da estimativa da velocidade de infiltração do experimento.

2.3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Com base na raiz do erro quadrático médio (REQM), o modelo que apresentou o melhor desempenho na maioria das repetições foi o modelo de Horton (Tabela 1), possivelmente pela utilização do suplemento *solver* do Excel[®] para determinar o valor ideal para um parâmetro desconhecido da equação empírica, em que esse suplemento faz simulações do parâmetro até encontrar o que melhor se adequa à equação utilizada. Dessa forma, pode ter minimizado a variabilidade entre o dado observado e o predito pelo modelo.

Embora apresente melhores resultados para REQM quando observadas todas as unidades experimentais, o modelo de Horton obteve o maior valor de REQM em 8 das 20 parcelas, o que justifica a utilização de outros testes estatísticos para determinação do modelo a ser utilizado. Já que quanto menor o REQM menor a variabilidade entre os valores preditos (SANTOS, VELLOSO e ARAÚJO, 2015).

A REQM é utilizada para auxiliar na acurácia dos resultados numéricos, indicando a variabilidade entre os valores do modelo e os observados em campo, ou seja, quanto menor a REQM menor a diferença entre eles (SHAO e BAUMGARTL, 2016).

Tabela 1: Comparação de três modelos (Kostiakov, K; Kostiakov-Lewis, KL; Horton, H), por meio da raiz do erro quadrático médio (RMSE), coeficiente de correlação de Pearson (r), índice de concordância de Willmott (D) e coeficiente de confiança (c), ajustados a partir de testes de velocidade de infiltração realizados ao final de cultivos agrícolas seqüenciais com doses de água residuária sanitária tratada (T1: 327,8

mm; T2: 647,8 mm; T3: 972,6 mm; T4: 1292,5 mm; T0: 0 mm) em quatro repetições

(B).

Bloc/Trat	Parâmetros					Bloc/Trat	Parâmetros				
	MODELO	RMSE	r	D	c		MODELO	RMSE	r	D	c
B1T1	K	55,19	0,95	0,85	0,81	B3T3	K	21,74	0,92	0,9	0,84
	KL	63,16	0,91	0,53	0,48		KL	29,64	0,95	0,76	0,73
	H	14,22	0,93	0,88	0,82		H	35,38	0,98	0,61	0,6
B2T1	K	60,12	0,96	0,94	0,9	B4T3	K	19,86	0,92	0,89	0,82
	KL	70,13	0,94	0,86	0,8		KL	26,07	0,96	0,65	0,62
	H	20,37	0,93	0,9	0,84		H	30,16	0,93	0,54	0,5
B3T1	K	128,68	0,96	0,91	0,87	B1T4	K	240,08	0,94	0,92	0,87
	KL	166,86	0,96	0,76	0,73		KL	292,17	0,89	0,84	0,75
	H	107,87	0,98	0,93	0,91		H	125,48	1	0,98	0,98
B4T1	K	81,76	0,98	0,94	0,92	B2T4	K	315,81	0,95	0,85	0,81
	KL	97,6	0,96	0,86	0,83		KL	317,73	0,94	0,72	0,68
	H	63,8	0,95	0,93	0,88		H	205,36	0,92	0,88	0,81
B1T2	K	71,92	0,98	0,92	0,91	B3T4	K	169,19	0,94	0,83	0,78
	KL	84,05	0,96	0,82	0,78		KL	178,73	0,99	0,78	0,77
	H	26,41	0,93	0,91	0,84		H	181,5	0,99	0,78	0,77
B2T2	K	140,67	0,96	0,91	0,88	B4T4	K	234,24	0,99	0,94	0,93
	KL	146,1	0,94	0,85	0,8		KL	270,3	0,94	0,89	0,84
	H	353,62	0,92	0,9	0,83		H	206,1	0,96	0,94	0,9
B3T2	K	64,63	0,96	0,93	0,89	B1T5	K	61,29	0,97	0,94	0,91
	KL	77,46	0,93	0,84	0,78		KL	70,41	0,98	0,89	0,87
	H	34,75	0,92	0,91	0,83		H	85,98	0,92	0,81	0,75
B4T2	K	59,05	0,95	0,84	0,8	B2T5	K	227,19	0,92	0,79	0,73
	KL	71,04	0,92	0,45	0,41		KL	235,73	0,9	0,54	0,48
	H	501,17	0,93	0,76	0,71		H	72,68	0,9	0,9	0,8
B1T3	K	15,2	0,93	0,91	0,84	B3T5	K	307,88	0,95	0,85	0,8
	KL	25,21	0,98	0,49	0,48		KL	313,85	0,94	0,75	0,7
	H	20,69	0,97	0,73	0,71		H	407,67	0,84	0,65	0,55
B2T3	K	200,7	0,95	0,83	0,79	B4T5	K	85,48	0,93	0,89	0,83
	KL	264,05	0,86	0,32	0,28		KL	97,1	0,86	0,7	0,6
	H	65,97	0,92	0,93	0,86		H	24,79	0,95	0,96	0,92

Para o modelo de Kostiakov-Lewis foram observados maiores REQM em grande parte das parcelas (Tabela 2), possivelmente pelo fato de que nesse modelo uma

constante (VIB) é adicionada em todos os dados preditos, isso inicialmente equidista os valores iniciais, porém, superestimam os finais (OKU e AIYELARI, 2011).

Uma vez que, quando a velocidade de infiltração se aproxima do equilíbrio horas após o início do teste, os valores observados estão baixos e o modelo adicionada constante eleva o valor da velocidade predita o que a distancia da velocidade observada.

Tabela 2: Modelos (Kostiakov, K; Kostiakov-Lewis, KL; Horton, H) com melhor desempenho nos testes de comparação utilizando a raiz do erro quadrático médio (RMSE), coeficiente de correlação de Pearson (r), índice de concordância de Willmott (d) e coeficiente de confiança (c) ao final de cultivos agrícolas sequenciais envolvendo doses de água residuária tratada (T1: 327,8 mm; T2: 647,8 mm; T3: 972,6 mm; T4: 1292,5 mm; T0: 0 mm), em quatro repetições (B).

Bloc/Trat	Testes estatísticos				Modelo com melhor desempenho
	RMSE	r	d	C	
B1T1	H	K	H	H	H
B2T1	H	K	K	K	K
B3T1	H	H	H	H	H
B4T1	H	K	K	K	K
B1T2	H	K	K	K	K
B2T2	K	K	K	K	K
B3T2	H	K	K	K	K
B4T2	K	K	K	K	K
B1T3	K	KL	K	K	K
B2T3	H	K	H	H	H
B3T3	K	H	K	K	K
B4T3	K	KL	K	K	K
B1T4	H	H	H	H	H
B2T4	H	K	H	K	-
B3T4	K	KL	K	K	K
B4T4	H	K	K	K	K
B1T5	K	KL	K	K	K
B2T5	H	H	H	K	H
B3T5	K	K	K	K	K
B4T5	H	H	H	H	H

Para o coeficiente de correlação de Pearson (r), embora os três modelos tenham apresentado resultados muito próximos, o proposto por Kostiakov mostrou-se mais eficiente em 13 das 20 parcelas (Tabelas 1 e 2).

O r é uma medida adimensional que pode assumir valores entre -1 e 1 e quantifica o grau de correção entre duas variáveis quantitativas. Valor r próximo a 1 indica alta correlação linear positiva, ou seja, que as variáveis são diretamente proporcionais. Já valores negativos, inversamente proporcionais e valores próximos a zero indicam baixa relação linear entre as variáveis (OLIVEIRA, 2018).

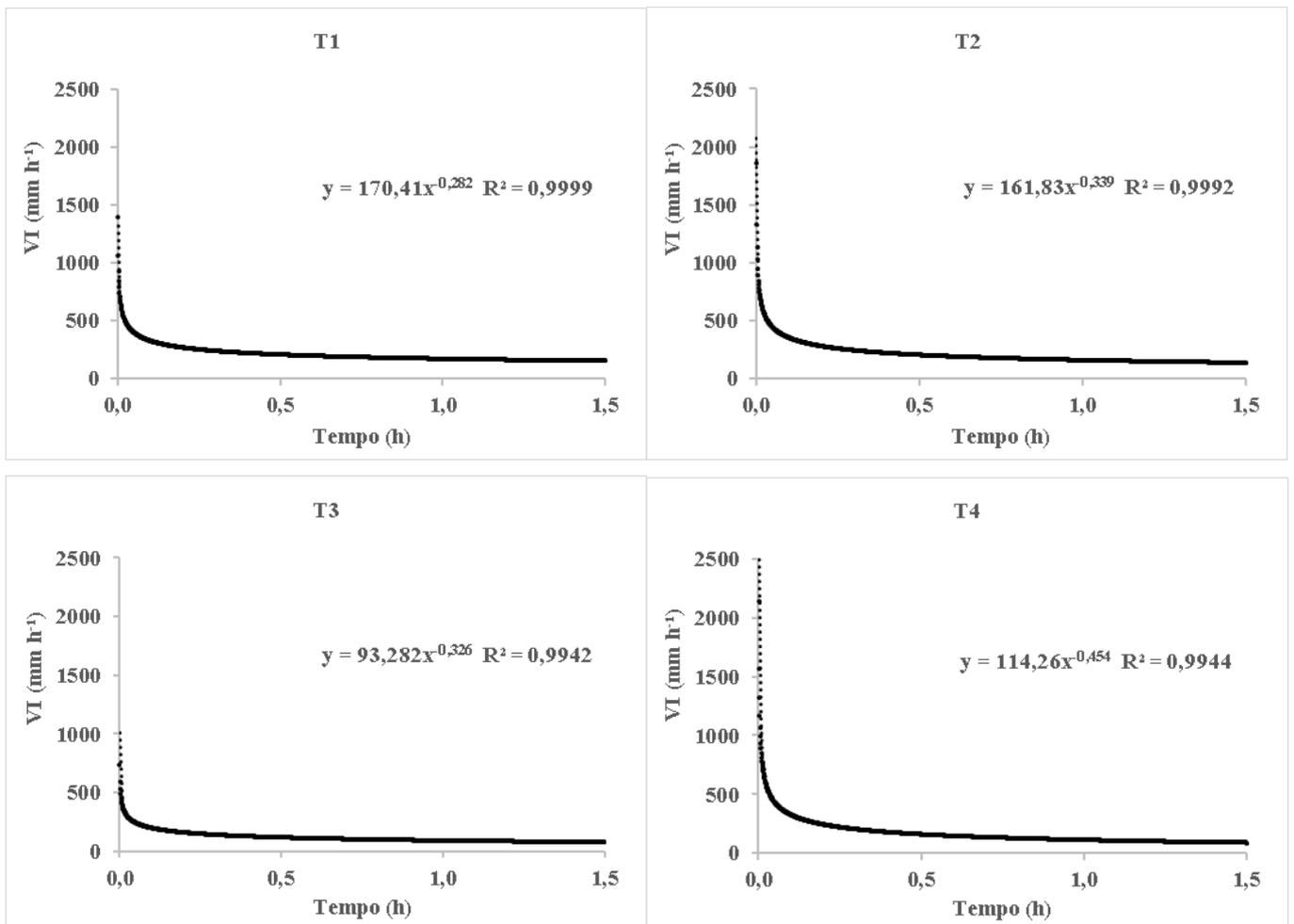
No entanto, o r utilizado para quantificar o grau em que duas variáveis estão relacionadas pode apresentar uma alta correlação que, não necessariamente, implica em existência de boa concordância entre os resultados de dois métodos quando avaliados isoladamente. Ele evidencia apenas o grau da associação linear entre conjuntos de observações, não a concordância entre eles (CUNHA *et al.*, 2015; XIMENES *et al.*, 2014).

Já o índice de concordância de Willmott (d) permite analisar a exatidão e está associado ao afastamento dos valores preditos dos valores observados. Quando se faz a associação do r e d encontra-se o índice de confiança (c), o qual foi descrito por Camargo&Sentelhas (1997) que determinaram um critério de interpretação para o índice.

Para o modelo K também se observou melhores resultados (Tabela 2) no índice de concordância de Willmott (13 parcelas) e no coeficiente de confiança (15 parcelas). De todas as avaliações o menor c do modelo K foi de 0,73 no B2T5 (Tabela 1), enquadrado como Bom (c entre 0,65-0,75), segundo Camargo&Sentelhas (1997).

É importante ressaltar que apenas na unidade experimental B2T5 o c ficou abaixo da classe Muito Bom no modelo de Kostiakov, sendo 9 classificadas como Ótimo ($c > 0,85$) e 10 como Muito Bom (c entre 0,75 e 0,85).

Devido ao desempenho do modelo de Kostiakov, ele foi considerado o que melhor se ajustou aos dados observados em campo. Dessa forma, plotou-se as curvas ajustadas para cada tratamento de acordo ao modelo de Kostiakov (Figura 2). Onde nota-se um alto coeficiente de determinação (R^2) indicando excelente porcentagem de variação que foi explicada pelo modelo.



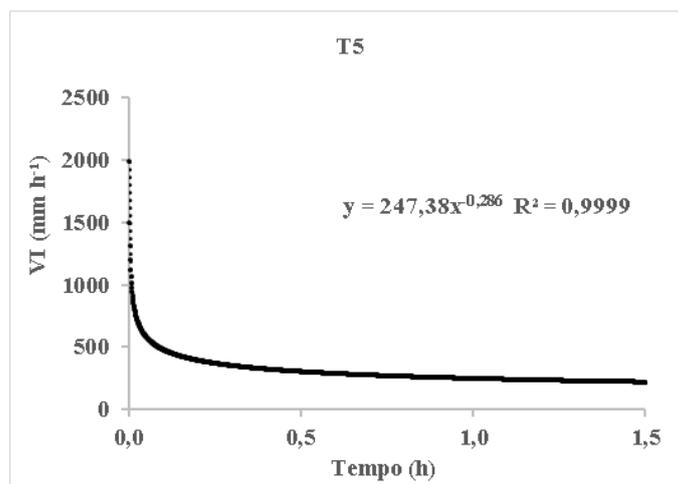


Figura 2: Média das velocidades de infiltração ajustadas pelo modelo de Kostiakov nos 5 tratamentos envolvendo doses de água residuária tratada (T1:327,8 mm; T2: 647,8 mm; T3: 972,6 mm; T4: 1292,5 mm; T5: 0 mm) ao final de 4 cultivos sequenciais.

O modelo K possui uma limitação que justifica o desenvolvimento do modelo de Kostiakov-Lewis já que no modelo de Kostiakov a VI tende a zero quando o tempo tende ao infinito, o que na prática não se observa já que a VI se estabiliza na velocidade de infiltração básica (BRANDÃO *et al.*, 2006). No entanto, nas condições do estudo, o modelo desenvolvido por Kostiakov mostrou-se o que mais se ajusta dentre os testados.

2.4. CONCLUSÕES

O modelo de Kostiakov é o mais indicado para testes de velocidade de infiltração, em Latossolo Vermelho Eutrófico fertirrigado com água residuária tratada.

O movimento da água no solo pode ser estimado pelo modelo de Kostiakov independentemente da dose de água residuária tratada.

AGRADECIMENTOS

À Companhia de Saneamento de Minas Gerais (COPASA) pela cessão da área experimental e análises da ART; à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES); à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais – FAPEMIG; e ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pela concessão de bolsas.

LITERATURA CITADA

ALMEIDA, W. S. DE; PANACHUKI, E.; OLIVEIRA, P. T. S. DE; SILVA MENEZES, R. DA; SOBRINHO, T. A.; CARVALHO, D. F. DE. Effect of soil tillage and vegetal cover on soil water infiltration. **Soil and Tillage Research**, v. 175, n. February 2017, p. 130–138, 2018.

ALVES, I. S. **Competição de cultivares de algodoeiro fertirrigadas com água residuária sanitária tratada**. 29 f. Monografia (Graduação em Agronomia) – Universidade Estadual de Montes Claros, Janaúba, MG. 2014.

ALVES, P. F. S.; SANTOS, S. R. DOS; KONDO, M. K.; ARAÚJO, E. D.; OLIVEIRA, P. M. DE. Fertirrigação do milho com água residuária sanitária tratada: crescimento e produção. **Engenharia Sanitaria e Ambiental**, 2018.

ANA. **Conjuntura dos recursos hídricos no Brasil 2018: informe anual/Agência Nacional de Águas**. BRASÍLIA-DF: 2018.

BERNARDO, S.; SOARES, A. A.; MANTOVANI, E. C. **Manual de irrigação**. UFV, 2006.

BISONE, S.; GAUTIER, M.; MASSON, M.; FORQUET, N. Influence of loading rate and modes on infiltration of treated wastewater in soil-based constructed wetland. **Environmental Technology (United Kingdom)**, v. 38, n. 1, p. 53–64, 2017.

BRANDÃO, V. DOS S.; CECÍLIO, R. A.; PRUSKI, F. F.; SILVA, D. D. DA. **Infiltração da água no solo**. Viçosa - MG.ed. 3, p. 120, 2006.

CAMARGO, A. P. DE; SENTELHAS, P. C. Avaliação do desempenho de diferentes métodos de estimativa da evapotranspiração potencial no Estado de São Paulo, Brasil.

Revista Brasileira de agrometeorologia, v. 5, n. 1, p. 89–97, 1997.

CUNHA, F. F.; SILVA, T. R.; XIMENES, A. R.; BATISTA, R. O. Comparative Study of Methods for Estimating Evapotranspiration Reference in Paranaíba City, Brazil.

Global Journal of HUMAN-SOCIAL SCIENCE: B, v. 15, n. 1, 2015.

EMBRAPA. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. 5. ed. Brasília, DF. 2018.

IRANDOUST, M.; TABRIZ, A. S. The effect of municipal wastewater on soil chemical properties. **Solid Earth Discussions**, n. February, p. 1–13, 2017.

MHASKE, A. R.; NIKAM, P. J. Impact of Treated Domestic Sewage Irrigation on Crop Yield, Plant Uptake and Soil Properties in Central India. **IRA-International Journal of Technology & Engineering (ISSN 2455-4480)**, v. 7, n. 2 (S), p. 79, 2017.

OKU, E.; AIYELARI, A. Predictability of Philip and Kostiaikov Infiltration Models under Inceptisols in the Humid Forest Zone , Nigeria. v. 602, p. 594–602, 2011.

OLIVEIRA, E. A. DE. **Métodos para análise de concordância: estudo de simulação e aplicação a dados de evaporação**. Tese (Doutorado em agronomia) - Universidade de São Paulo, São Paulo, SP. 2018.

OLIVEIRA, F. S. **Fertirrigação do abacaxizeiro com água residuária sanitária tratada**. 29 f. Tese (Doutorado em Agronomia) – Universidade Estadual de Montes Claros, Janaúba, MG. 2018.

OLIVEIRA, P. C. P. DE; GLOAGUEN, T. V.; GONÇALVES, R. A. B.; SANTOS, D. L.; COUTO, C. F. Soil chemistry after irrigation with treated wastewater in semiarid climate. **Revista Brasileira de Ciencia do Solo**, v. 40, p. 1–13, 2016.

PAUDEL, I.; COHEN, S.; SHAVIV, A.; BAR-TAL, A.; BERNSTEIN, N.; HEUER, B.; EPHRATH, J. Impact of treated wastewater on growth, respiration and hydraulic conductivity of citrus root systems in light and heavy soils. **Tree Physiology**, v. 36, n. 6, p. 770–785, 2016.

PAULA, A.; BERTOSSI, A. Influência da aplicação de águas residuárias sobre a infiltração de água no solo Influence of wastewater on water infiltration into the soil. **Revista Verde de Agroecologia e Desenvolvimento Sstentável**, p. 188–193, 2013.

PRIMO, D. F.; TREVISAN, D. P.; DUARTE, R. T. Análise comparativa de métodos de estimativa de evapotranspiração para fins agrícolas na região de São Carlos – SP. **Rev. Bras. de Iniciação Científica (RBIC)**, Itapetininga, v. 6, n.1, p. 13-32, jan./mar., 2019.

RUELAS, J. L. J. **Modelagem do parâmetro de irrigação: um estudo de caso para o capim Sudão BRS Estribo**, RS. 82p. Dissertação (Mestrado em Computação Aplicada) – Universidade Federal do Pampa, 2018.

SANTANA, J. S.; LIMA, E. F.; SILVA, W. A.; FERNANDES, M. C.; RIBEIRO, M. I. D. Equações de estimativa da evapotranspiração de referência (eto) para a região de Balsas-MA. **Enciclopédia Biosfera, Centro Científico Conhecer** - Goiânia, v.15 n.27; p.1. 2018.

SANTOS, D. L.; VELLOSO, S. G. S.; ARAÚJO, J. G. DE. Determinação da taxa de infiltração de água no solo e lâmina infiltrada em Latossolo Vermelho-Amarelo. **Enciclopédia Biosfera, Centro Científico Conhecer**, v. 11, n. 22, p. 957–966, 2015.

SANTOS, S. R.; RIBEIRO, D. P.; MATOS, A. T.; KONDO, M. K.; ARAÚJO, E. D. Changes in soil chemical properties promoted by fertigation with treated sanitary wastewater. **Engenharia Agrícola**, v. 37, n. 2, 2017.

SHAO, Q.; BAUMGARTL, T. Field Evaluation of Three Modified Infiltration Models for the Simulation of Rainfall Sequences. v. 181, n. 2, p. 45–56, 2016.

TEIXEIRA, P. C.; DONAGEMMA, G. C.; FONTANA, A.; TEIXEIRA, W. G. T. **Manual de Métodos de Análise de Solo**. 3. ed. Brasília, DF: Embrapa, 2017.

XIMENES, A. R.; SANCHES, F. M.; CORADI, P. C.; CUNHA, F. F. Performance of different methods for estimating reference evapotranspiration on the distinct annual seasons in Minas Gerais State. **Brazilian Geographical Journal: Geosciences and Humanities research medium**, Ituiutaba, v. 5, n. 2, p. 630-643, jul./dec. 2014.

WILKS, D. S. **Statistical Methods in the atmospheric sciences second edition**. v. 2, p. 648. 2005.

WILLMOTT, C. J. On the validation of models. **Physical geography**, v. 2, n. 2, p. 184–194, 1981.

WILLMOTT, C. J.; MATSUURA, K. Advantages of the mean absolute error (MAE) over the root mean square error (RMSE) in assessing average model performance. **Climate research**, v. 30, n. 1, p. 79–82, 2005.

3. ARTIGO 2

Caracterização físico-hídrica do solo após cultivos fertirrigados com água residuária sanitária tratada

Resumo: Elevadas cargas de esgoto ainda têm como destino os corpos hídricos no país sendo o uso agrícola uma realidade viável. Dessa forma, após o encerramento do último cultivo dos quatro sucessivos utilizando água residuária sanitária tratada para o fornecimento parcial de nutrientes às plantas, avaliou-se possíveis alterações nas características físico-hídricas em Latossolo Vermelho eutrófico. O experimento foi realizado em Janaúba – MG, mantendo-se a mesma área e parcelas em todos os cultivos, onde se utilizaram cinco tratamentos, (0: água e adubação mineral; 1: 50; 2: 100; 3: 150 e 4: 200% da dose de água residuária tratada limitada pelo elemento referência K⁺ e no último cultivo 0: água e adubação mineral; 1: 100; 2: 200; 3: 300 e 4: 400% da dose, limitada pelo Na⁺) no delineamento em blocos casualizados, com quatro repetições. Avaliaram-se a velocidade de infiltração básica e fixada no tempo 1,5 h e condutividade hidráulica na superfície do solo, e em quatro camadas de 0,2 m a condutividade elétrica do extrato saturado, porcentagem de sódio trocável, argila dispersa em água, disponibilidade total de armazenamento de água e as umidades nos pontos de capacidade de campo e murcha. Verificou-se uma diminuição linear de 0,0972 mm h⁻¹, 0,0997 mm h⁻¹ e 0,0073 cm h⁻¹, respectivamente, na velocidade de infiltração básica, no tempo de 1,5 h e condutividade hidráulica, para cada milímetro de água residuária incrementada no solo, além de aumento da porcentagem de sódio trocável nas profundidades avaliadas. Todavia, tais alterações não ultrapassam limites considerador seguros na literatura.

Palavras-chave: Infiltração; retenção de água; fertirrigação; esgoto sanitário; reúso de água.

Physical-hydrical characterization of the soil after fertirrigated crops with treated sanitary water

Abstract: High sewage loads are still destined for the water bodies in the country, and agricultural use is a viable reality. Thus, after the conclusion of the last crop of the four successive plants using sanitary wastewater treated for the partial nutrient supply to the plants, it was evaluated possible changes in the physical-hydrological characteristics in Eutrophic Red Latosol. The experiment was carried out in Janaúba, MG, and the same area and plots were maintained in all crops, where 5 treatments were used (0: water and mineral fertilization, 1: 50, 2: 100, 3: 150 and 4 : 200% of the treated wastewater limited by the reference element K + and in the last 0: water and mineral fertilization, 1: 100, 2: 200, 3: 300 and 4: 400% of the dose, limited by Na +) in the design in randomized blocks with 4 replicates. The basic and fixed infiltration rates were 1.5 h and hydraulic conductivity at the soil surface, and in 4 layers of 0.2 m electrical conductivity of the saturated extract, exchangeable sodium percentage, clay dispersed in water, total availability of water storage and the humidities at the points of field capacity and withered. A linear decrease of 0.0972 mm h⁻¹, 0.0997 mm h⁻¹ and 0.0073 cm h⁻¹, respectively, was observed at the basic infiltration rate, at a time of 1.5 h and hydraulic conductivity, for each mm of wastewater increased in the soil, in addition to increasing the exchangeable sodium percentage at the depths evaluated. However, such changes do not exceed limits considered safe in the literature.

Keywords: Infiltration; water retention; fertigation; sanitary sewage; water reuse.

3.1. INTRODUÇÃO

A redução do regime pluviométrico observada no Brasil nos últimos anos, sobretudo em regiões semiáridas, é um processo alarmante e exige investimentos em tecnologias e estudos para o uso eficiente da água de boa qualidade.

O lançamento de forma direta de esgoto nos corpos hídricos receptores, contribui na diminuição da qualidade da água e ainda é situação comum em muitas cidades do país (ANA, 2017). Mesmo depois do tratamento e seguindo a legislação vigente (BRASIL, 2005; MINAS GERAIS, 2008), os efluentes dos sistemas de tratamento ainda possuem elementos capazes de eutrofizar os corpos receptores.

Um dos destinos possíveis para a água residuária sanitária tratada (ART) é a agricultura (ALVES NETO *et al.*, 2016; ALVES *et al.*, 2018; SANTOS *et al.*, 2016; SILVA, 2018). Tal possibilidade conserva a água de boa qualidade disponível e promove uma reciclagem natural de nutrientes (LIBUTTI *et al.*, 2018).

No entanto, é necessário ter cuidados no uso da ART como fonte de nutrientes para as plantas, uma vez que, aplicações sucessivas podem comprometer a qualidade do solo (SANTOS *et al.*, 2017), como, por exemplo, promover alterações na infiltração e movimentação de água no solo devido ao risco de dispersão de argila (MATOS *et al.*, 2014).

O conhecimento de características físico/químicas do solo é de suma importância para um manejo consciente e seguro da ART. Diversos estudos ressaltam a importância do tema (CARVALHO *et al.*, 2014; NASCIMENTO e FILHO, 2015; SANTOS, dos *et al.*, 2016; SILVA, 2018).

Diante do exposto, objetivou-se avaliar possíveis alterações no movimento e retenção de água em Latossolo Vermelho Eutrófico, depois do cultivo sequencial com a aplicação de água residuária sanitária tratada.

3.2. MATERIAL E MÉTODOS

O experimento foi conduzido de janeiro a março de 2018 na área experimental da Copasa/Unimontes, localizada ao lado da Estação de Tratamento de Esgoto (ETE) de Janaúba - MG, cujas coordenadas geográficas correspondem a 15° 46' 14,5" S e 43° 19' 14,31" W, com altitude de 534 m. O clima é classificado como Aw, tropical com estação seca, de acordo com a classificação de Köppen. O solo do local é classificado como Latossolo Vermelho eutrófico (EMBRAPA, 2018).

A área avaliada foi cultivada em quatro ciclos envolvendo água residuária aplicada em quatro culturas, sendo elas o milho (novembro de 2012 a fevereiro de 2013) (ALVES *et al.*, 2018), algodão (junho a novembro de 2013) (ALVES, 2014), feijão comum (abril a junho de 2014) (SANTOS *et al.*, 2017) e abacaxi (julho de 2015 a março de 2017) (OLIVEIRA, 2018).

Todos os cultivos foram conduzidos na mesma área e nas mesmas parcelas experimentais envolvendo 5 tratamentos de ART (0: água limpa e adubação mineral; 1: 50; 2: 100; 3: 150 e 4: 200% da dose de ART limitada pelo elemento referência K^+ nos 3 primeiros cultivos e 0: água limpa e adubação mineral; 1: 100; 2: 200; 3: 300 e 4: 400% da dose de ART limitada pelo elemento referência Na^+ no abacaxizeiro) (Tabela 1), sendo os referidos tratamentos dispostos no delineamento em blocos completos casualizados, com quatro repetições, o que possibilitou a quantificação das doses de ART totais aplicadas em cada uma das parcelas experimentais, conforme Tabela 1.

Tabela 1. Doses de água residuária sanitária tratada (ART, mm) parciais aplicadas nos cultivos sequenciais de milho (nov/2012 a fev/13), algodoeiro (jun a nov/13), feijoeiro comum (abr a jun/14) e abacaxizeiro (jul/15 a mar/17) e totais em cada tratamento.

Dose*	Milho	Algodoeiro	Feijoeiro	Abacaxizeiro	Totais
0	0	0	0	0	0
1	61,2	103,2	46,1	117,3	327,8
2	122,0	200,0	91,7	234,1	647,8
3	180,5	302,9	137,8	351,4	972,6
4	240,2	399,7	184,3	468,3	1292,5

*Fonte: Alves, 2014; Alves *et al.*, 2018; Santos *et al.*, 2017; Oliveira, 2018, adaptado.

Em todos os ciclos de cultivo que antecederam as avaliações buscou-se, com manejo da irrigação, manter a umidade na capacidade de campo até os 0,5 m de profundidade, no intuito de atender a demanda hídrica de cada cultura. Pela exigência em água ser superior à de nutrientes contidos na ART, foi feita a complementação com água limpa em todos os tratamentos, via sistema de irrigação por gotejamento em ambos os tipos de água, com emissores espaçados 0,4 m entre si e 0,9 m entre linhas laterais e com vazão média igual a 5,81 L h⁻¹.

A fim de estimar a velocidade de infiltração básica (VIB) e a condutividade hidráulica de água no solo (K_0), procedeu-se o método de Infiltrômetro de Anéis Concêntricos para cada unidade experimental (TEIXEIRA *et al.*, 2017). Em busca de uma equação que melhor se ajustasse às curvas dos dados brutos disponíveis pós-teste, selecionou-se, dentre os disponíveis, três modelos empíricos, Kostiakov, Kostiakov-Lewis e Horton (BRANDÃO *et al.*, 2006).

Após gerar uma curva para cada modelo, fez-se uma sequência de testes de comparação de modelos visando definir qual deles seria o que melhor representasse os dados de campo (CAMARGO e SENTELHAS, 1997; WILLMOTT, 1981; WILLMOTT e MATSUURA, 2005), sendo o Kostiakov o de melhor desempenho.

Definido o modelo determinou-se a VIB partindo do princípio de que a estabilização da infiltração ocorre quando a variação das velocidades em torno da média dos últimos valores medidos estivesse dentro $\pm 10\%$ no intervalo de 60 minutos (BERNARDO, SOARES e MANTOVANI, 2006).

Além disso, visto que o tempo de estabilização estava acima de 3 horas para a maioria dos tratamentos, determinou a velocidade de infiltração para o tempo fixado de 1,5 h ($VI_{1,5}$), a fim de notar se as respostas de infiltração na primeira metade do tempo médio de estabilização seriam similares às respostas das VIB.

Após determinar as velocidades de infiltração básicas, utilizou-se de um modelo empírico descrito por Bernardo *et al.* (2006), para estimar a condutividade hidráulica saturada (K_0) de cada parcela.

Amostras de solo foram coletadas para determinação da densidade aparente pelo método do anel volumétrico, sendo coletadas duas amostras nas camadas 0 a 0,2 m; 0,2 a 0,4 m; 0,4 a 0,6 m e 0,6 a 0,8 m (TEIXEIRA *et al.*, 2017). Além disso, também foram coletadas amostras em duplicatas com estrutura deformada com o auxílio de um trado para determinação da curva de retenção de água no solo, pelo método da câmara de Richards nas mesmas profundidades supracitadas (TEIXEIRA *et al.*, 2017).

As amostras deformadas foram utilizadas para a determinação da condutividade elétrica do extrato saturado do solo (CE_{es}), da argila dispersa em água (ADA) e do percentual de sódio trocável (PST)(TEIXEIRA *et al.*, 2017).

De posse das curvas de retenção e as densidades das camadas de cada unidade experimental (UE), calculou-se as umidades na capacidade de campo (θ_{cc}) e no ponto de murcha permanente (θ_{pm}) obtidas, respectivamente, a 20 kPa (definido a partir de teste de campo) e 1500 kPa. Além disso, também foi calculada a disponibilidade total de água no solo (DTA).

O estudo baseou-se nas seguintes variáveis: VIB, VI_{1,5}, K₀, CE_{es}, PST, ADA, DTA, θ_{cc} , θ_{pm} . Os dados foram interpretados por meio de análise de variância preliminar ao nível de 5% de significância do teste F e, para aquelas variáveis cuja fonte de variação doses de ART foram significativas, aplicou-se a análise de regressão, com teste F a até 5% de significância. Os modelos da regressão foram escolhidos com base na significância do teste F, nos coeficientes de determinação (R^2) e na capacidade de explicar o fenômeno estudado, além da aplicação do teste t para os parâmetros, ao nível de 5% de significância. A análise estatística foi feita com auxílio do *programa* SISVAR (FERREIRA, 2011).

3.3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A velocidade de infiltração básica (VIB) e a velocidade de infiltração no tempo fixado em 1,5 h (VI_{1,5}) apresentaram alterações ($p < 0,05$) (Tabela 2), sendo explicadas por regressões lineares decrescentes (Figura 1). Houve uma redução na infiltração à medida que se aumentaram as lâminas de ART, possivelmente pelas características da ART que podem alterar a dinâmica da água no solo em camadas além do controle da irrigação no manejo (SANTOS *et al.*, 2017).

O manejo da irrigação em uma profundidade pré-estabelecida pode lixiviar componentes fertirrigados, como sódio, para o limite da profundidade em que se almeja elevar à capacidade de campo, que na área estudada foi até os 0,4 m. Caso ocorra um desbalanço entre íons monovalentes pode desencadear em alterações no fluxo da água no solo (SANTOS *et al.*, 2015).

Tabela 2. Resumo da análise de variância para velocidade de infiltração básica (VIB), velocidade de infiltração em 1,5 horas (VI_{1,5}) e condutividade hidráulica (K₀) submetidas a diferentes doses de água residuária tratada (ART) ao final de quatro ciclos de cultivo.

FV	GL	Quadrado Médio		
		VIB mm h ⁻¹	VI _{1,5} mm h ⁻¹	K ₀ cm h ⁻¹
Bloco	3	2935,6	2267,1	5,50
ART	4	10421,5 *	12010,1 *	58,64 *
Resíduo	12	14128,71	17359,77	6,62
CV (%)		31,48	27,51	31,48
Média geral		109,01	138,27	8,18

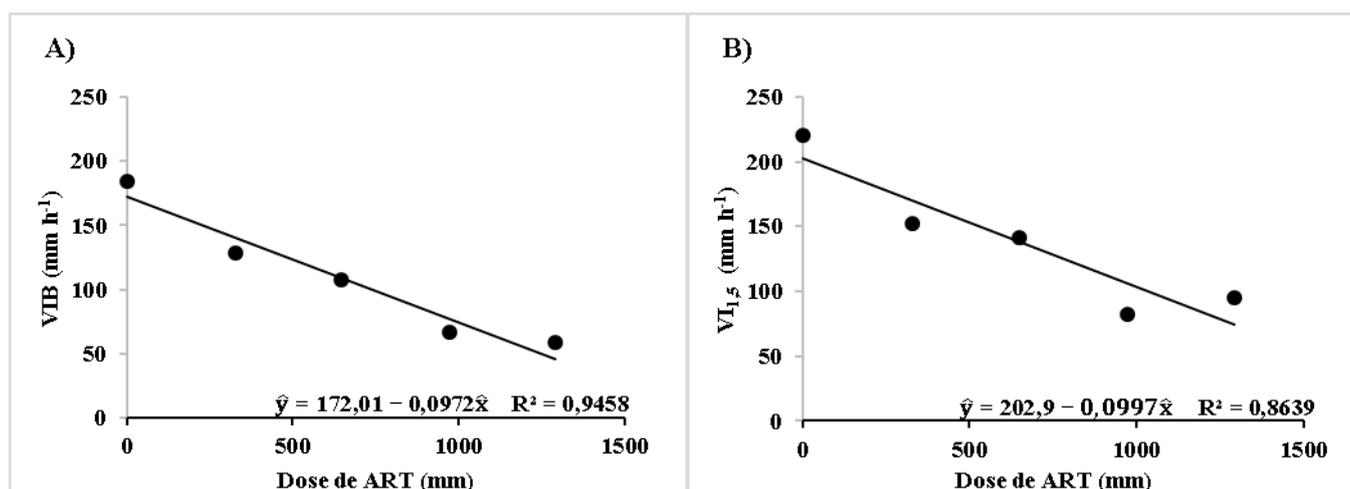


Figura 1. Velocidade de infiltração básica (A) e Velocidade de infiltração em tempo fixado em 1,5 h (B) estimados pelo modelo de Kostiakov para doses de água residuária sanitária tratada (ART) ao final de quatro ciclos de cultivo. *significativo ao nível de 5%, pelo teste t.

A VI_{1,5} manteve-se próxima da VIB, indicando que para o tempo de 1,5 h a infiltração já se aproximava numericamente da infiltração em momento de solo saturado. O que indica uma boa capacidade de infiltração do solo mesmo para as maiores doses de ART.

Embora tenha havido uma redução linear de $0,0972 \text{ mm h}^{-1}$ e $0,0997 \text{ mm h}^{-1}$ para cada milímetro de ART incrementada ao solo, na VIB e $VI_{1,5}$, respectivamente (Figura 1), a infiltração pode ser considerada alta em todos os tratamentos avaliados, inclusive para o de maior redução (T4), pois de acordo com Bernardo *et al.* (2006), a velocidade de infiltração acima de 30 mm h^{-1} é considerada alta em áreas de lavouras. Ainda assim, recomendam-se cuidados no uso sequencial na dose de ART aplicada na fertirrigação, já que a VIB apresentada pelas parcelas que receberam as maiores doses aplicadas (T4) foi muito inferior ao tratamento que não recebeu ART (T0).

A condutividade hidráulica saturada (K_0) também foi influenciada ($p > 0,05$) pelas lâminas de ART aplicadas (Tabela 2), explicada por uma regressão linear decrescente (Figura 2), de forma similar a VIB.

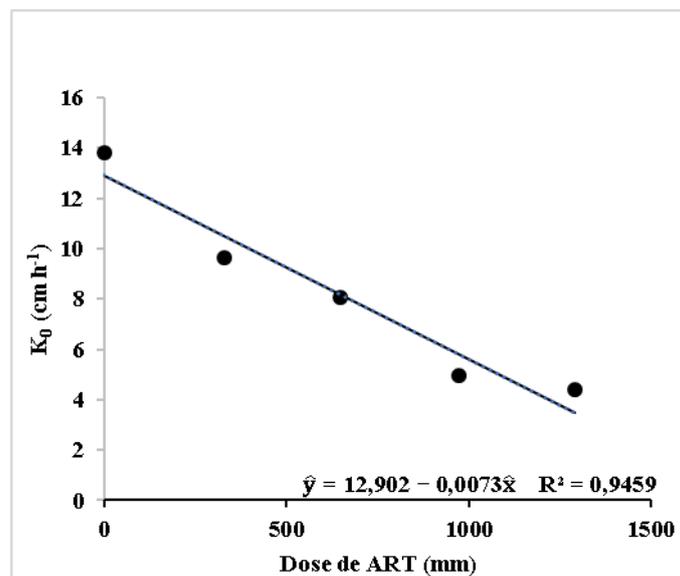


Figura 2. Condutividade hidráulica (K_0) influenciada por diferentes doses de água residuária sanitária tratada (ART) ao final de quatro ciclos de cultivo. *significativo ao nível de 5%, pelo teste t.

Houve uma redução na K_0 de moderadamente rápida à moderada segundo classificação de Ferreira (1998) que estipulou limites para classificação (Muito rápida,

superior a 25 cm h⁻¹; Rápida, de 12,5 a 25 cm h⁻¹; Moderadamente rápida, de 6,25 a 12,5 cm h⁻¹; Moderada, de 2,0 a 6,25 cm h⁻¹; Moderadamente lenta, de 0,5 a 2,0 cm h⁻¹; Lenta, de 0,125 a 0,5 cm h⁻¹; Muito lenta, inferior a 0,125 cm h⁻¹).

A ART possui sólidos suspensos, significativos teores de eletrólitos, matéria orgânica dissolvida e alta demanda bioquímica de oxigênio (DBO), o que pode justificar as alterações na K₀ mesmo sem ter sido notado alterações estatísticas na estrutura do solo (BEDBABIS *et al.*, 2014; MHASKE e NIKAM, 2017; VARALLO *et al.*, 2010).

Mesmo com uma redução linear de 0,0073 cm h⁻¹ para cada 1 mm de ART acrescida ao solo (Figura 3), a K₀ ainda se manteve em níveis satisfatórios, sem riscos ao movimento da água no solo, já que em regiões semiáridas há comprometimento da K₀ em solos cujas taxas forem abaixo de 0,6 cm h⁻¹ (Schacht e Marschner, 2014). No entanto, a menor K₀ encontrada no presente trabalho foi de 3,47 cm h⁻¹.

A infiltração, a condutividade hidráulica, a umidade no solo nos limites superior (capacidade de campo, U_{cc}) e inferior (U_{pm}) e a disponibilidade total de água (DTA) dependem diretamente do tipo de solo e da estrutura, sendo o solo da área estudada enquadrado na classe textural franco-argilo-arenosa na camada de 0-0,2 m e com o aumento do conteúdo de argila no perfil, atingindo a classe franco argiloso, na camada de 0,6-0,8 m (EMBRAPA, 2018; SANTOS *et al.*, 2015).

Diferenças significativas observadas para a PST nas três camadas analisadas (Tabela 3), sendo representadas por regressões lineares crescentes (Figura 3). Houve um incremento da PST de 0,0071%, 0,0057% e 0,0045% para cada mm de ART incrementada ao solo, nas camadas 0-0,2, 0,2-0,4 e 0,4-0,6 m, respectivamente. Tais respostas podem ser explicadas pela concentração de sódio presente na ART, conforme verificado nos trabalhos desenvolvidos ao longo dos ciclos de cultivo na área

experimental (ALVES, 2014; ALVES *et al.*, 2018; OLIVEIRA, 2018; SANTOS *et al.*, 2017).

Tabela 3. Resumo da análise de variância para argila dispersa em água (ADA), condutividade elétrica do extrato de saturação do solo (CE_{es}), disponibilidade total de água (DTA), umidade na capacidade de campo (θ_{cc}), umidade no ponto de murcha (θ_{pm}) e percentual de sódio trocável (PST), realizadas no perfil do solo final de quatro ciclos de cultivo.

Prof. (m)	FV	GL	Quadrado Médio					
			CE_{es} dS m ⁻¹	PST %	ADA g kg ⁻¹	θ_{pm} cm ³ cm ⁻³	θ_{cc} cm ³ cm ⁻³	DTA mm cm ⁻¹
0 - 0,2	Bloc.	3	0,01	0,0004	1932,36	0,0004	0,0008	0,03
	Trat.	4	0,026 ^{ns}	0,00008 [*]	266,83 ^{ns}	0,0001 ^{ns}	0,0007 ^{ns}	0,08 ^{ns}
	Res.	12	0,13	0,0001	447,56	0,0001	0,0010	0,16
CV (%)			31,6	9,44	14,1	9,44	12,54	23,29
Média geral			0,32	0,13	150,35	0,13	0,25	1,74
0,2 - 0,4	Bloc.	3	0,005	62,71	3748,8	0,0001	155,3	0,12
	Trat.	4	0,015 ^{ns}	33,18 [*]	218,03 ^{ns}	0,0002 ^{ns}	0,0011 ^{ns}	0,35 ^{ns}
	Res.	12	0,012	17,39	581,5	0,0001	0,0008	0,240
CV (%)			32,40	79,50	14,08	7,61	10,39	26,58
Média geral			0,34	5,24	171,25	0,14	0,26	1,86
0,4 - 0,6	Bloc.	3	0,03	37,16	1908,91	0,0003	0,0009	0,10
	Trat.	4	0,04 ^{ns}	21,99 [*]	637,47 ^{ns}	0,0004 ^{ns}	0,0006 ^{ns}	0,21 ^{ns}
	Res.	12	0,02	12,71	1290,69	0,0003	0,0017	0,35
CV (%)			31,15	69,64	18,97	9,77	14,06	30,59
Média geral			0,40	5,12	199,95	0,17	0,29	1,94
0,6 - 0,8	Bloc.	3	0,02	-	1987,99	0,0001	0,0010	0,11
	Trat.	4	0,011 ^{ns}	-	8620,12 ^{ns}	0,0005 ^{ns}	0,0003 ^{ns}	0,31 ^{ns}
	Res.	12	0,02	-	5963,22	0,0002	0,0170	0,20
CV (%)			30,12	-	37,45	9,86	12,63	20,93
Média geral			0,48	-	206,18	0,16	0,30	2,15

* Significativo a 5%,^{ns} não significativo, pelo teste F.

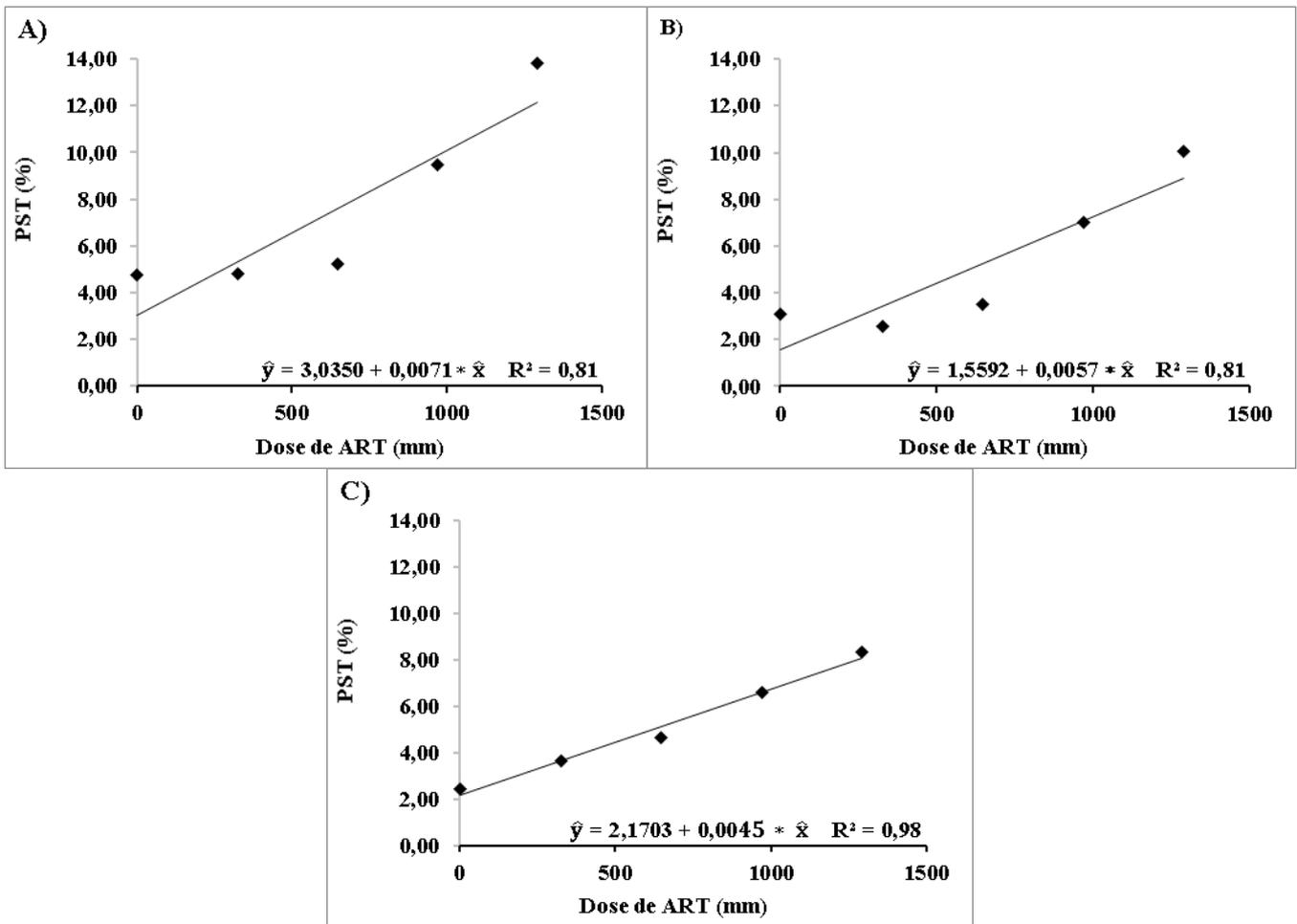


Figura 3. Porcentagem de sódio trocável (PST) em três camadas do solo (0-0,2 m, A; 0,2-0,4 m, B e 0,4-0,6 m, C) influenciada por diferentes doses de água residuária tratada (ART) ao final de quatro ciclos de cultivo. * significativo ao nível de 5% pelo teste F.

Embora a PST tenha sido incrementada nos tratamentos de ART, não se observou diferença significativa para a ADA, e para a CE_{es} que não foram influenciadas pela ART (Tabela 3). Isso pode ser explicado pelos valores de PST ainda se manterem abaixo de 15% (AYERS e WESCOT, 1991; PIZARRO CABELLO, 1985) até mesmo com as maiores doses de ART.

Isso reforça a tese de manutenção do critério de fertirrigação com base no elemento referência para definir a dose de ART, a fim de evitar problemas futuros na

estruturção do solo advindos principalmente do sódio em relação aos demais íons, podendo reduzir de forma mais expressiva a VIB e VI_{1,5} (Figura 1).

As condições de manejo com fontes salinizantes podem incrementar sais e elementos dispersantes ao solo, sendo esses indiretamente quantificados pela condutividade elétrica do estrato saturado (CE_{es}) e a porcentagem de sódio trocável (PST), sendo ambas utilizadas para classificação de solos em normais, salinos, sódicos e salino-sódicos (PIZARRO CABELLO, 1985).

A proporção entre a PST e a CE_{es} pode promover a dispersão de argilas (ADA), alterando a estrutura do solo (PIZARRO CABELLO, 1985). Por isso, estas variáveis também foram quantificadas.

A não significância ($p > 0,05$) da θ_{cc} , θ_{pm} e DTA (Tabela 3) em nenhuma camada avaliada confirma a segurança em usar o critério dedose da ART pautada em um elemento referência. Ainda assim, embora as respostas não tenham sido contrastadas entre camadas, notam-se maiores valores de DTA nas camadas mais profundas, possivelmente justificados pelo manejo da irrigação que tende a lixiviar íons para estas camadas do solo.

Os resultados para CE_{es} foram satisfatórios já que valores de CE_{es} abaixo de 1,3 dS m⁻¹ não oferecem risco de redução na produtividade das principais culturas agrícolas (AYERS e WESCOT, 1991). Além disso, notou-se que as médias apresentadas na avaliação da CE_{es} foram muito baixas, não ultrapassando 0,5dS m⁻¹.

Como não houve efeito da ART na dispersão de argilas (Tabela 3), os resultados de U_{cc}, U_{pm} e DTA observados são plausíveis, já que a dispersão de argilas diminui a quantidade de macroporos na composição do solo e, conseqüentemente, aumenta a quantidade de microporos, alterando a disponibilidade de água no solo e incrementando

as umidades na capacidade de campo e ponto de murcha (LOY *et al.*, 2018; MARCHUK e MARCHUK, 2018).

3.4. CONCLUSÕES

O uso de água residuária sanitária tratada na fertirrigação não compromete o movimento e a retenção de água nas condições avaliadas neste estudo, haja visto as alterações promovidas não terem ultrapassado os limites tidos como seguro em literatura.

AGRADECIMENTOS

À Companhia de Saneamento de Minas Gerais (COPASA) pela cessão da área experimental e análises da ART; à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES); à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais – FAPEMIG; e ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pela concessão de bolsas.

LITERATURA CITADA

ALVES, I. S. **Competição de cultivares de algodoeiro fertirrigadas com água residuária sanitária tratada**. 29 f. Monografia (Graduação em Agronomia) – Universidade Estadual de Montes Claros, Janaúba, MG. 2014.

ALVES NETO, A. J.; LANA, M. C.; RAMPIM, L.; COSTA, L. A. D. M.; COPPO, J. C. ALVES, A. G. Água residuária de suinocultura sobre a produtividade de soja e milho segunda safra: uso e viabilidade econômica. (Swine wastewater on soybean and second crop corn yield: use and economic viability). **Scientia Agraria Paranaensis**, v. 15, n. 3, p. 350–357, 2016.

ALVES, P. F. S.; SANTOS, S. R. DOS; KONDO, M. K.; ARAÚJO, E. D.; OLIVEIRA, P. M. DE. Fertirrigação do milho com água residuária sanitária tratada: crescimento e produção. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, 2018.

ANA. **Agência Nacional de Águas (ANA) - Atlas Esgotos - Despoluição de bacias hidrográficas**. BRASÍLIA-DF: 2017.

AYERS, R. S.; WESCOT, D. W. **A qualidade da água na agricultura (Estudos FAO: Irrigação e Drenagem, 29 revisado 1)**. 1. ed. Campina Grande, PB: UFPB, 1991.

BEDBABIS, S.; ROUINA, B. BEN; BOUKHRIS, M.; FERRARA, G. Effect of irrigation with treated wastewater on soil chemical properties and infiltration rate. **Journal of Environmental Management**, v. 133, p. 45–50, 2014.

BERNARDO, S.; SOARES, A. A.; MANTOVANI, E. C. **Manual de irrigação**. [s.l.] UFV, 2006.

BRANDÃO, V. DOS S.; CECÍLIO, R. A.; PRUSKI, F. F.; SILVA, D. D. DA. **Infiltração da água no solo**. 3. ed. Viçosa, MG: p. 120, 2006.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. Resolução CONAMA 357, de 18 de março de 2005. Dispõe sobre a classificação dos corpos de água e diretrizes ambientais para o

seu enquadramento, bem como estabelece as condições e padrões de lançamento de efluentes, e dá outras providências. **Diário Oficial da União**. Brasília, DF, 18/03/2005, n. 053, p. 58-63. Disponível em: <<http://www.mma.gov.br/port/conama/res/res05/res35705.pdf>>. Acesso em: 25 nov. 2018.

CAMARGO, A. P. DE; SENTELHAS, P. C. Avaliação do desempenho de diferentes métodos de estimativa da evapotranspiração potencial no Estado de São Paulo, Brasil. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, v. 5, n. 1, p. 89–97, 1997.

CARVALHO, N.; HENTZ, P.; SILVA, J. M.; BARCELLOS, A. L. Reutilização de águas residuárias Reuse of waste water. **Revista Monografias Ambientais**, v. 14, n. 2, p. 3164–3171, 2014.

EMBRAPA. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. 5. ed. Brasília, DF: Brasília, DF: Embrapa, 2018., 2018.

FERREIRA, D. F. Sisvar: um sistema computacional de análise estatística. **Ciência e Agrotecnologia**, v. 35, n. 6, p. 1039–1042, 2011.

FERREIRA, P. A. **Drenagem de Terras Agrícolas**. 3. ed. Brasília - DF : ABEAS: 1998.

LIBUTTI, A.; GATTA, G.; GAGLIARDI, A.; VERGINE, P.; POLLICE, A.; BENEDEUCE, L.; DISCIGLIO, G.; TARANTINO, E. Agro-industrial wastewater reuse for irrigation of a vegetable crop succession under Mediterranean conditions. **Agricultural Water Management**, v. 196, p. 1–14, 2018.

LOY, S.; ASSI, A. T.; MOHTAR, R. H.; MORGAN, C.; JANTRANIA, A. The effect of municipal treated wastewater on the water holding properties of a clayey, calcareous soil. **Science of the Total Environment**, v. 643, p. 807–818, 2018.

MARCHUK, S.; MARCHUK, A. Effect of applied potassium concentration on clay dispersion, hydraulic conductivity, pore structure and mineralogy of two contrasting Australian soils. **Soil and Tillage Research**, v. 182, n. April, p. 35–44, 2018.

MATOS, A. T. DE; MATOS, M. P. DE. **Disposição de Águas Residuárias no Solo**. 1.

ed. Viçosa-MG: v, 1, p. 371, 2017.

MATOS, A. T.; MARTINS, P. O.; MONACO, P. A. V. LO. Alterações Químicas no Solo Após Fertirrigação do Capim Mombaça com Água Residuária de Curtume. **Revista Engenharia na Agricultura - REVENG**, v. 22, n. 2, p. 128–137, 15 maio 2014.

MINAS GERAIS. Conselho Estadual de Política Ambiental. Conselho Estadual de Recursos Hídricos do Estado de Minas Gerais – COPAM/CERH-MG. Deliberação Normativa Conjunta COPAN/CERH n001, de 05 de maio de 2008. Dispõe sobre a classificação dos corpos de água e diretrizes ambientais para o seu enquadramento, bem como estabelece as condições e padrões de lançamento de efluentes, e dá outras providências. **Diário do Executivo “Minas Gerais”**. Belo Horizonte, MG, 20/05/2008. Disponível em: <<http://www.siam.mg.gov.br/sla/>>. Acesso em: 25 nov. 2018.

MHASKE, A. R.; NIKAM, P. J. Impact of treated domestic sewage irrigation on crop yield, plant uptake and soil properties in Central India. **IRA-International Journal of Technology & Engineering (ISSN 2455-4480)**, v. 7, n. 2 (S), p. 79, 2017.

NASCIMENTO, J. D. S.; FILHO, J. F. Crescimento, produção e alterações químicas do solo em algodão irrigado com água de esgotos sanitários tratados. 1. v. 28, n. 2, p. 36–45, 2015.

OLIVEIRA, F. S. **Fertirrigação do abacaxizeiro com água residuária sanitária tratada**. Tese (Doutorado em agronomia) - Universidade Estadual De Montes Claros, MG. p. 143. 2018.

PIZARRO CABELLO, F. **Drenaje agrícola y recuperación de suelos salinos**. 2. ed. Agrícola Española, 1985.

SANTOS, S. R. DOS; SOARES, A. A.; KONDO, M. K.; ARAÚJO, E. D.; CECON, P. R. Crescimento e produção do algodoeiro fertirrigado com água residuária sanitária no semiárido de Minas Gerais. **Irriga**, v. 21, n. 1, p. 40–57, 2016.

SANTOS, S. R.; KONDO, M. K.; OLIVEIRA, P. M. DE; JÚNIOR, I. DE O. A.; MATOS, A. T. DE. Short-term changes in soil properties due to sanitary wastewater irrigation used as a potassium source. **Australian Journal of Crop Science**, 2015.

SANTOS, S. R.; RIBEIRO, D. P.; MATOS, A. T.; KONDO, M. K.; ARAÚJO, E. D. Changes in soil chemical properties promoted by fertigation with treated sanitary wastewater. **Engenharia Agrícola**, v. 37, n. 2, 2017.

SCHACHT, K.; MARSCHNER, B. Treated wastewater irrigation effects on soil hydraulic conductivity and aggregate stability of loamy soils in Israel. **Journal of Hydrology and Hydromechanics**, v. 63, n. 1, p. 47–54, 2014.

SILVA, T. L. DA. Qualidade da água residuária para reuso na agricultura irrigada. **Irriga Botucatu**, v. 1, n. 1, p. 101–111, 2018.

TEIXEIRA, P. C.; DONAGEMMA, G. C.; FONTANA, A.; TEIXEIRA, W. G. Manual de Métodos de Análise de Solo. p. 573, 2017.

VARALLO, A. C. T.; CARVALHO, L.; SANTORO, B. L.; SOUZA, C. F. Alterações nos atributos de um Latossolo Vermelho-amarelo irrigado com água de reúso. (Alterations in attributes of a Red-yellow Latosol irrigated with reuse water). **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 14, n. 4, p. 372–377, 2010.

WILLMOTT, C. J. On the validation of models. **Physical geography**, v. 2, n. 2, p. 184–194, 1981.

WILLMOTT, C. J.; MATSUURA, K. Advantages of the mean absolute error (MAE) over the root mean square error (RMSE) in assessing average model performance. **Climate research**, v. 30, n. 1, p. 79–82, 2005.